

0 / 529777

30 MAR 2005

PATENTTI- JA REKISTERIHALITUS  
NATIONAL BOARD OF PATENTS AND REGISTRATION

PCT/FI 03/00683

Helsinki 17.11.2003

E T U O I K E U S T O D I S T U S  
P R I O R I T Y D O C U M E N T



Hakija  
Applicant

Noveltech Solutions Ltd  
Lieto

Patentihakemus nro  
Patent application no

20021734

Tekemispäivä  
Filing date

30.09.2002

Kansainvälinen luokka  
International class

G01N

RECD 28 NOV 2003

WIPO PCT

Keksinnön nimitys  
Title of invention

"Fotoakustinen detektori"

Täten todistetaan, että oheiset asiakirjat ovat tarkkoja jäljennöksiä  
Patentti- ja rekisterihallitukselle alkuaan annetuista selityksestä,  
patenttivaatimuksista, tiivistelmästä ja piirustuksista.

This is to certify that the annexed documents are true copies of the  
description, claims, abstract and drawings originally filed with the  
Finnish Patent Office.

Eija Solja

Eija Solja  
Apulaistarkastaja

RULE 17.1(a) OR (b)

PRIORITY  
DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED  
BUT NOT IN COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

Maksu 50 EUR  
Fee 50 EUR

Maksu perustuu kauppa- ja teollisuusministeriön antamaan asetukseen 1027/2001  
Patentti- ja rekisterihallituksen maksullisista suoritteista muutoksineen.

The fee is based on the Decree with amendments of the Ministry of Trade and Industry No.  
1027/2001 concerning the chargeable services of the National Board of Patents and  
Registration of Finland.

Osoite: Arkadiankatu 6 A Puhelin: 09 6939 500 Telefax: 09 6939 5328  
P.O.Box 1160 Telephone: + 358 9 6939 500 Telefax: + 358 9 6939 5328  
FIN-00101 Helsinki, FINLAND

BEST AVAILABLE COPY

## 47 Fotoakustinen detektori – Fotoakustisk detektor

5 Keksinnön kohteena on jäljempänä esitettyjen itsenäisten patenttivaatimusten johdanto-osissa esitetty fotoakustinen detektori ja mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa sekä menetelmä fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittamiseksi.

10 Kun infrapunasäteily tai valo yleensä osuu kaasutäytteiseen kammioon, jossa on tutkittavaa kaasua osapaineessa  $p_x$  ja kantokaasua osapaineessa  $p_N$  (tyypillisesti usein typpeä), kaasu  $p_x$  absorboi säteilyä. Absorptioprosessin jälkeen energia muuttuu lämpöliikkeeksi tietyllä aikavakiolla  $\tau$  (esim.  $10^{-5}$  s). Tällöin koko kaasun lämpötila noussee  $\Delta T$  verran aikayksikössä. Lämpötilan nousu aikaansaa myöskaan paineen nousun  $\Delta p$ .

15 Tyypillinen fotoakustinen detektori käsitteää kammion, johon tutkittavaa kaasua voidaan johtaa, ikkunan moduloidun tai pulssitetun infrapunasäteilyn tai valon päästämiseksi kammioon, ja paineanturin, joka on järjestetty mittamaan absorboituneen infrapunasäteilyn tai valon aikaansaamia painevaihteluita kammiossa. Paineanturi on tyypillisesti mikrofoni, ohut Mylar- tai metallikalvo. Fotoakustista detektoria voidaan käyttää mittamaan tai havaitsemaan infrapunasäteilyä yleisesti, mutta detektorin eräs spesifinen ja tärkeä käyttö liittyy kaasujen tai kaasuseosten mittamiseen ja havaitsemiseen liittyen esimerkiksi ilmanlaatuun tai -saasteisiin.

20 Mikrofoneissa kalvon (Mylar) liikettä mitataan tavallisesti kapasitiivisesti. Mylar – kalvo päälystetään metallilla ja asetetaan lähelle toista kiinteää metallikalvoa. Tällöin syntyy kondensaattori, jonka kapasitanssi on

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{h}, \quad (a)$$

jossa  $h$  on kalvojen välinen etäisyys lepotilassa,  $A$  kalvojen pinta-ala,  $\epsilon_r \epsilon_0$  levyjen välissä olevan kaasun dielektrisyysvakio ja  $\epsilon_0$  vastaava tyhjölle. Mittaamalla  $C$  saadaan  $h$ , joka antaa Mylar -kalvon liikkeen, koska

$$\Delta C = -\frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{3h^2} \Delta h, \quad (b)$$

5

jossa  $\Delta h$  on etäisyyden muutos keskellä ja  $\Delta h/3$  on keskimääräinen etäisyyden muutos. Edelleen

$$\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta h}{h} \quad (c)$$

eli

10

$$|\Delta h_{\min}| = \frac{h}{C/\Delta C} = \frac{h}{S/N}, \quad (d)$$

jossa  $S/N$  on mittaavan elektroniikan signaali-kohinasuhde.

15

Tunnetun tekniikan mukaisia kapasiteettimittauksia rajoittaa levyjen välissä olevan kaasun virtaus, kun  $h$  muuttuu. Välin  $h$  pienetessä kaasun täytyy virrata levyjen välistä ulos ja takaisin  $h$ :n kasvaessa. Virtauksella on hitautta ja se vaatii energiaa. Tästä seuraa, että mitä suurempi on kalvon väärähtelykulmataajuus  $\omega$  ja mitä pienempi  $h$  sitä enemmän virtaus pienentää kalvon liikkeen amplitudia. Täten  $h$ :ta ei voida pienentää rajattomasti, mikä kasvattaisi signaalia  $\Delta C$ . Tästä johtuen tunnetut kaupalliset mikrofonit toimivat fysikaalisten lakienvälinen rajoilla, eikä niiden herkkyyttä voida parantaa niiltä osin.

20

Nicolas Lederman et al. esittävät julkaisussaan [1] anturin fotoakustiseen detektoriin, jossa anturi on muodostettu ovimaisesta kalvosta, joka reagoi kaasun liikkeeseen fotoakustisen detektorin kammiossa, ja johon kalvoon on integroitu pietsosähköinen elementti, joka rekisteröi oven liikkeen. Julkaisussa esitetyn anturin ongelmana on se, että oven resonanssitaajuutta ei ole huomioitu. Todennäköisesti anturiin kiinnitetty pietsosähköinen elementti kasvattaa anturin resonanssitaajuutta ja näin ollen huonontaa anturin vastetta. Julkaisussa esitetty anturi on melko epätarkka eikä näin ollen soveltu suurta tarkkuutta vaativiin sovelluskohteisiin. Julkaisussa ei

30

myöskään ole esitetty fotoakustisen detektorin kammion ja anturin optimointia eli kammion koon suhdetta anturin kokoon.

Myös M. H. de Paula et al. ovat julkaisuissaan [2] ja [3] esittäneet vaihtoehdon perinteiselle kalvoratkaisulle. Julkaisuissa on esitetty fotoakustisen detektorin kammion pienien reiän päälle kieli noin 0,1 millimetrin etäisyydelle reiästä. Julkaisussa esitetyn mukaisesti kieli ei käsitä ns. karmia kielen ympäillä, jolloin kieli ulottuu reiän reunojen ulkopuolelle eli kyseessä ei ole julkaisussa [1] esitetynkaltainen ovi. Perusongelmana de Paula et al.:n julkaisuissa onkin näin ollen se, että fotoakustisen detektorin kammiossa vaikuttava ja mitattava paine kohdistuu vain pieneen osaan kielen kokonaispinta-alasta, mikä pienentää vastetta merkittävästi. Lisäksi vuoto kielen alta on suuri suhteessa reiän kokoon, mikä edelleen alentaa kielen vastetta. Julkaisussa [2] ja [3] on lisäksi esitetty optinen kulmamittaus kielen liikkeen mittamiseksi. Julkaisuissa esitetyn kielen muoto on kuitenkin käytännössä epäedullinen kulmamittaukselle. Näin ollen julkaisuissa [2] ja [3] esitetty ratkaisu ei ole riittävän herkkä erittäin tarkkoihin mittauksiin ja suurta tarkkuutta vaativiin sovellustuskohteisiin.

Fotoakustisen detektoinnin ongelmana on lisäksi sen häiriintymisen ulkoisista äänistä. Näin ollen, jos kammion sisällä oleva, mittalaitteen ulkopuolelta vuotanut ääni on voimakkaampaa kuin systeemin oma kohina, detektorisysteemin herkkyyden (vasteen) parantaminen ei paranna tutkittavan kaasun määritystä. Tyyppillinen menetelmä ulkoisista äänistä syntyvien häiriöiden vähentämiseksi on äänen eristäminen. Eristämällä voidaan vaimentaa ulkoääniä kertoimella 10000 – 100000.

Eräs toinen tunnettu keino ulkoisista äänistä aiheutuvien häiriöiden vähentämiseksi on käyttää kaksoisdetektiota, jolla saadaan osittain äänen häiriötä pienennetyksi. Tunnetuissa kaksoisdetektiojärjestelmissä tehdään identtinen mittaussysteemi varioiden mittausjärjestelmän kanssa, johon identtiseen systeemiin ei pääse valoa, ja joka mittaa pelkästään ääntä kammion sisällä. Sen jälkeen tunnettujen järjestelmien

mukaisissa ratkaisuissa vahvistetaan suoraan varsinaisen mittaussignaalin ja identtisen mittaussysteemin antaman referenssignaalin erotus. Kuvatun kaltaisten kaksoisdetektiojärjestelmien ongelmana on kuitenkin mm. se, että nämä järjestelmät toimivat vain erikoistilanteessa kapealla taajuuskaistalla. Ongelman syynä on mittaussysteemien antureiden välille syntyvä vaihe-ero.

5

Esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin ja mittausjärjestelyn fotoakustisessa detektorissa sekä menetelmän fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittamiseksi tarkoituksesta onkin poistaa tai ainakin vähentää edellä mainitusta tekniikan tasosta johtuvia ongelmia.

10

Lisäksi esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin ja mittausjärjestelyn fotoakustisessa detektorissa sekä menetelmän fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittamiseksi tarkoituksesta on aikaansaada tarkka ja erittäin herkkä fotoakustinen detektori.

15

Edelleen lisäksi esillä olevan keksinnön tarkoituksesta on saada aikaan fotoakustinen detektori ja mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa, jossa ulkoisista äänistä syntyvien häiriötekijöiden vaikutusta mittaustulokseen on vähennetty.

20

Mm. edellä mainittujen tarkoituksienv toteuttamiseksi keksinnön mukaiselle fotoakustiselle detektorille ja mittausjärjestelylle fotoakustisessa detektorissa sekä menetelmälle fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittamiseksi on pääasiassa tunnusomaista se, mikä on esitetty oheisten itsenäisten patenttivaatimusten tunnusmerkkiosissa.

25

Tällöin tyypillisessä esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa välineet anturin liikkeen mittamiseksi käsittevät ainakin yhden tai useamman valolähteen anturin tai sen osan valaisemiseksi ja yhden tai useamman monidetektori detektorin anturista heijastuneen valon vastaanottamiseksi ja anturin liikkeen mit-

30

taamiseksi optisena kulma- ja/tai translaatiomittauksena. Monidetektori detektorilla tarkoitetaan tässä yhteydessä detektoria, joka käsittää kaksi, kolme tai useampia detektoria eli nimettynä vastaavasti kaksoisdetektoreita, kolmoisdetektoreita jne. Toisin sanoen detektoreita, joista saadaan useita erillisiä mittauksignaaleita eli kaksoisdetektorista kaksi mittauksignaalia ja kolmoisdetektorista kolme mittauksignaalia jne. Monidetektori detektorit voidaan toteuttaa liittämällä yhteen useita erillisiä detektoreita tai valmistamalla esimerkiksi samaan runkoon kolme detektoria. Myös esimerkiksi rividetektoria, kuten CCD-rividetektori, voidaan käyttää tässä yhteydessä tarkoitettuna monidetektori detektorina. CCD-rividetektoria voidaan käyttää korvaamaan sekä kaksoisdetektori että kolmoisdetektori.

Näin aikaan saadaan anturin toimintaa käytännössä lähes häiritsemätön mittausmenetelmä ja -järjestelmä. Mittauksen häiritsemättömyydyllä tarkoitetaan sitä, että mittausmenetelmä ei käytännössä häiritse ja/tai vaimenna anturin liikettä eli optisten hiukkasten vaikutus oven liikkeeseen on käytännön mittausovellutuksissa katsottava tässä yhteydessä merkityksettömäksi. Edullisesti käytettävä valonlähde on laser tai ohut hehkulanka. Hehkulangan etuna on se, että sen avulla saadaan aikaan laaja lineaarisuusalue.

Kaksoisdetektorin etuna on se, että anturin liikkeen mittaus voidaan suorittaa sekä kulmamittauksena että translaatiomittauksena. Kulmamittauksessa on edullista, että valoläheen lähetämän valonsäteen fokus on järjestetty likimain kaksoisdetektorin pinnalle. Translaatiomittauksessa on tyypillisesti edullista, että valonläheen lähetämän valonsäteen fokus on järjestetty likimain oven tai kalvon pinnalle sekä kaksoisdetektorille.

Eräässä edullisessa esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa välineet anturin liikkeen mittamiseksi käsittävät ainakin valoläheenä toimivan laserin, ainakin yhden optisen linssin lasersäteen kohdistamiseksi, referenssipeilin, säteenjakajan lasersäteen jakamiseksi anturille ja referenssipeilille ja detektorina

toimivan kolmois- tai rividetektorin säteenjakajalta tulevien lasersäteiden vastaanottamiseksi. Erittäin edullisesti referenssipeili on järjestetty siten, että kolmois- tai rividetektorille syntyy  $\frac{3}{4}$  osaa interferenssijuovasta.

5 Eräässä erittäin edullisessa esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa välineet anturin liikkeen mittaanmiseksi käsitteväät lisäksi kiinteän tasopeilin ja kiinteän päätypeilin, jotka on järjestetty siten, että laservalo kulkee päätypeilin ja takaisin heijastuen edestakaisin anturin ja tasopeilin välillä. Erittäin edullisesti tasopeili ja/tai päätypeili on järjestetty siten, että säteenjakajalta anturi kautta päätypeilille kulkevaksi järjestetty lasersäde palaa samaa optista tietä takaisin päätypeililtä säteenjakajalle.

10

Eräs erittäin edullinen esillä olevan keksinnön mukainen fotoakustinen detektori käsitteää lisäksi kolmannen kammion, joka on suljettu ja kooltaan identtinen ensimmäisen kammion kanssa, ja jossa on ensimmäisen kammion käsitämän aukon kanssa identtinen aukko, joka yhdistää kolmannen kammion toiseen kammioon, ja joka kolmannen kammion aukko on suljettu vastaavalla anturilla kuin ensimmäisen kammion aukko, ja jonka anturin liikettä mitataan vastaavalla tavalla kuin ensimmäisen kammion aukon sulkevan aukon liikettä, sekä välineet ensimmäisen kammion aukkoon järjestetystä anturista mitatun varsinaisen mittaussignaalin ja kolmannen kammion aukkoon järjestetystä anturista mitatun referenssesignaalin amplituden laskemiseksi ja niiden erotuksen aikaansaamiseksi:

25 Tyypillinen esillä olevan keksinnön mukainen mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaanmiseksi käsitteää ainakin valolähteenä toimivan laserin tai hehkulangan, ainakin yhden optisen linssin valonsäteen kohdistamiseksi, referenssipeilin, säteenjakajan valonsäteen jakamiseksi anturille ja referenssipeilille, kiinteän tasopeilin ja kiinteän päätypeilin, jotka on järjestetty siten, että valonsäde kulkee päätypeiliin ja takaisin heijastuen edestakaisin an-

turin ja tasopeilin väillä, ja detektorina toimivan kolmois- tai rividetektorin säteenjakajalta tulevien valonsäteiden vastaanottamiseksi.

Tyypillisessä esillä olevan keksinnön mukaisessa menetelmässä fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittamiseksi mittaus suoritetaan optisena mittauksena, jolloin anturia tai sen osaa valaistaan ja anturista heijastunutta valoa mitataan monidetektori detektorilla. Tällöin anturin liike mitataan kulmamittauksena kohdistamalla valonsäteen fokus likimain kaksois- tai rividetektorille ja mittaamalla heijastuneen valonsäteen siirtymää kaksois- tai rividetektorilla, tai anturin liike mitataan translaatiomittauksena kohdistamalla valonsäteen fokus likimain anturin pinnalle ja kaksois- tai rividetektorille ja mittaamalla heijastuneen valonsäteen siirtymää kaksois- tai rividetektorilla, tai anturin liike mitataan translaatiomittauksena käyttäen interferometria, ja mittaamalla anturista heijastuneen valonsäteen interferenssijuovan siirtymistä kolmois- tai rividetektorilla. Valonsäteen kohdistamisella likimain anturin pinnalle ja/tai kaksois- tai rividetektorin pinnalle tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että valonsäteen fokus on anturin ja/tai kaksois- tai rividetektorin pinnalla sillä tarkkuudella kuin se teknisesti on mahdollista.

Keksintöä selostetaan seuraavassa lähemmin viittaamalla oheiseen piirustukseen, jossa

- 20      Kuvio 1    esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin rakennetta,
- Kuvio 2    esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä oven kulmamuutoksen perusteella,
- 25      Kuvio 3    esittää kaaviomaisesti valotehoa kaksoisdetektorilla kuvion 2 mukaisessa mittausjärjestelyssä,
- Kuvio 4    esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä oven translaatiomittauksen perusteella,

Kuvio 5 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä perustuen Michelsonin interferometrin käyttöön,

5 Kuvio 6 esittää kaaviomaisesti kuvion 5 mukaisessa mittausjärjestelyssä kolmoisdetektorille syntyvää interferenssijuovaa,

Kuvio 7 esittää kaaviomaisesti tangentin epäjatkuvuuskohtia,

Kuvio 8 esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin paineanturia yläviistosta

10 Kuvio 9a esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin paineanturia edestä,

Kuvio 9b esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin paineanturin poikkileikkausta,

Kuvio 10a esittää kaaviomaisesti resonanssikulmataajuuden  $\omega_0$  vaikutusta amplitudiin  $A_x(\omega)$ ,

15 Kuvio 10b esittää kaaviomaisesti oven resonanssin mallinnusta,

Kuvio 11 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin oven erästä edullista muotoa,

Kuviot 12a ja 12b esittävät kaaviomaisesti eräitä vaihtoehtoisia esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin oven muotoja, ja

20 Kuvio 13 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä moninkertaiseen heijastukseen perustuvan optisen kertojan avulla.

25 Kuviossa 1 on kaaviomaisesti esitetty esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin eräs suoritusmuoto. Kuviossa esitetyn mukaisesti fotoakustinen detektori käsittää kaasutäytteiset kammioit  $V$  ja  $V_0$ , joissa on tai joihin voidaan johtaa tutkittavaa kaasua osapaineessa  $p_x$  ja kantokaasua osapaineessa  $p_N$  (tavallisesti usein typpiä). Ensimmäinen kammio  $V_0$  on muodostettu rengasmaisesta runkoosasta 1, jonka ensimmäiseen avoimeen päähän on järjestetty kammion ensimmäisen pään sulkeva ikkuna 2, jonka läpi infrapunasäteily tai valo yleensä voidaan joh-

taa kammioon. Ikkuna 2 on edullisesti valmistettu hyvin infrapunasäteilyä ja/tai valoa läpäiseväksi ja sen paksuus on edullisesti noin 3 – 6 mm. Kammion  $V_0$  mitoitus ja sen optimointi on tarkemmin esitetty alla. Kammion  $V_0$  toiseen avoimeen päähän on järjestetty kammion toisen pään ainakin osittain sulkeva, paineanturina toimiva piiovi 3, jonka rakenne on tarkemmin esitetty kuvioissa 8 ja 9. Piioven 3 tilalla voidaan käyttää myös mikrofonia, ohutta Mylar- tai metallikalvoa. Fotoakustinen detektori käsitteää ensimmäisen kammion  $V_0$  toisen pään jatkeeksi järjestetyn toisen kammion V, joka muodostaa mittaustilan, jolla on tilavuus  $V$ . Mittaustilaan on järjestetty piioven liikkeen mittausvälineet. Mittaustilan toinen pää on kuviossa 1 esitetyn mukaisesti suljettu referenssijärjestelmällä, joka käsitteää toisesta päästä suljettun referenssikammion  $V_0$ , joka on kooltaan identtinen ensimmäisen kammion  $V_0$  kanssa. Referenssikammion  $V_0$  ensimmäinen pää on suljettu vastaavalla piiovella kuin ensimmäinen kammiokin.

15 Fotoakustisen anturin tarkkuutta voidaan parantaa korvaamalla tunnetun tekniikan mukainen kapasitiivinen oven tai kalvon liikkeen mittaaminen esillä olevan keksinnön mukaisella optisella mittausjärjestelyllä. Optinen mittaaminen häiritsee erittäin vähän oven tai kalvon liikettä. Esillä olevan keksinnön mukaisesti liikettä voidaan mitata joko oven tai kalvon kulman tai oven tai kalvon jonkin pisteen translatioliikkeen avulla.

20 Kuviossa 2 on esitetty kulmamittaukseen perustuva mittausjärjestely, jossa käytetään laserilla 10 toteutettua optista viisaria kaksoisdetektorin 11 ollessa detektorina. Mittausjärjestely käsitteää anturina toimivan oven 3 lisäksi valolähteenä toimivan laserin 10, optisen linssin 12 valonsäteen kohdistamiseksi ja kaksoisdetektorin 11 ovesta 3 heijastuneen valonsäteen v vastaanottamiseksi ja mittamiseksi. Kaksoisdetektori käsitteää siis ensimmäisen detektorin d1 ja toisen detektorin d2. Valonsäteen fokus 13 on kaksoisdetektorilla. Kuviossa 3 on esitetty mittausjärjestelyn valo- teho kaksoisdetektorilla, jossa jokaisessa y:n pisteessä on valon intensiteetti integroitu y:tä vastaan kohtisuorassa suunnassa.

5 Kuvioissa 4 ja 5 esitetyn kulmamittauksen kulman muutos  $\Delta\alpha$  muunnetaan translaa-  
tioliikkeeksi  $\Delta y = a2\Delta\alpha$ , joka mitataan kaksoisdetektorilla  $d_1d_2$ . Kulma  $\Delta\alpha$  on kes-  
kimääräinen kulmamuutos lasersäteen valaisemalla alueella ovessa. Yleisesti  $\Delta\alpha$   
riippuu mittauspaikasta eli  $l$ :stä

$$\tan \Delta\alpha = \frac{FL^2}{6EI} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right] = \frac{8EI\Delta x L^2}{6L^3 EI} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right] = \frac{4\Delta x}{3L} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right], \quad (27)$$

eli

$$10 \quad \Delta y \approx 2a \frac{4\Delta x}{3L} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right]. \quad (28)$$

Pienin liike, joka voidaan mitata kaksoisdetektorilla on

$$15 \quad \Delta y_{\min} = \frac{\sigma}{2(S/N)}, \quad (29)$$

jossa  $\sigma$  on laserfokuksen puoliarvoleveys. Minimissään  $\sigma$  on diffraktion rajoittama  
eli

$$\sigma = \frac{\lambda}{D}(a+b). \quad (30)$$

20 Tällöin havaittava minimiliike oven päässä on

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{3L\Delta y_{\min}}{8a \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right]} = \frac{3L\lambda(a+b)}{2D(S/N)8a \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right]} = \frac{3L\lambda(a+b)}{16aD \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right] (S/N)}. \quad (31)$$

25 Valaistun alueen leveys ovessa on  $aD / [(a+b) \cos\beta]$ , mikä antaa lopullisen rajoituk-  
sen. Jos  $b \approx 0$  ja  $l \approx L$ , niin edellisestä yhtälöstä saadaan

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{3L\lambda}{16D(S/N)}. \quad (32)$$

Käytännössä  $D \leq L$ , eli

$$30 \quad \Delta x_{\min} \approx \frac{3\lambda}{16(S/N)}, \quad (33)$$

jossa  $S$  on laserin teho  $I_0$  ja  $N$  valon ja elektroniikan summakohina.

Signaalin (valotehon vaihtelun) amplitudi

$$5 \quad A_v = \Delta P_{d_1} - \Delta P_{d_2} = 2\Delta y I_{max}, \quad (34)$$

jossa  $\Delta P_{d1}$  ja  $\Delta P_{d2}$  ovat valotehon muutokset detektoreilla  $d_1$  ja  $d_2$  sekä  $I_{max}$  on maksimivaloteho /  $\Delta y$ . Nyt yhtälön (28) avulla

$$10 \quad A_v = a \frac{16A_x I_{max}}{3L} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right] \approx \frac{16aA_x}{3L} \frac{P_{d_1} + P_{d_2}}{\sigma} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right], \quad (35)$$

jossa  $P_{d1} + P_{d2} = I_0$  on kaksoisdetektorille osuvan laserin valoteho.

Siis optisen viisarin valosignaalin amplitudi on

$$15 \quad A_v = \frac{16aDI_0A_x}{3L\lambda(a+b)} \approx \frac{16I_0A_x}{3\lambda}, \quad (36)$$

jossa  $A_x$  on oven liikkeen  $x$  amplitudi, jonka on oltava  $< \lambda$ .

20 Esillä olevan keksinnön mukaisen optisen viisarin etuna on mm. sen yksinkertainen rakenne, se ei häiritse oven liikettä ja kaksoisdetektori vaimentaa laserin valon fotonikohinaa. Edullisesti laserin valoläikän koko ovella on suuri,  $D \approx L$ , jotta  $\sigma$  olisi pieni. Esillä olevan keksinnön mukaista optista viisaria voidaan käyttää myöskin kalvon liikkeen mittaanmiseen, jolloin optimaalinen mittauspaikka on  
25  $r/\sqrt{3}$ .

30 Oven liike voidaan esillä olevan keksinnön mukaisesti mitata siis myös translatiomittauksena. Kuviossa 4 on esitetty esillä olevan keksinnön mukainen mittausjärjestely, joka ei ole kulmamittaus ja jolla oven translatioliike  $x$  voidaan mitata. Mittausjärjestely käsittää oven lisäksi valonlähteenä toimivan laserin 10, kaksoisdetek-

torin 11, ensimmäisen optisen 12 linssin valonsäteen fokuksen 13 kohdistamiseksi lepotilassa eli liikkumattomassa tilassa olevan oven 3 pinnalle ja toisen optisen linssin 12 ovesta 3 heijastuvan valonsäteen kohdistamiseksi kaksoisdetektorille. Valonlähde, optiset linssit ja kaksoisdetektori on järjestetty siten, että kun ovi on lepotilassa on ovella tulevan ja siitä heijastuvan valonsäteen välinen kulma 90 astetta. Mittauksen etuna on mm. se, että lasersäde on fokuksessa oven pinnalla ja oven optinen laatu voi olla huono. Minimiliike, joka mittausjärjestelyllä voidaan havaita on

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{\sqrt{2}a\lambda}{4D(S/N)}, \quad (37)$$

10

jos ovessa on peilipinta.

Minimiliike on samaa suuruusluokkaa kuin kulmamittauksessa eli  $\Delta x_{\min} = \lambda / (S/N)$ , jos  $D = \sqrt{2}a/4$ . Myös translaatiomittaus soveltuu myös kalvon liikkeen mittaukseen.

15

Oven tai kalvon liikettä voidaan mitata esillä olevan keksinnön erään edullisen sovellusmuodon mukaisesti optisesti myös interferometriä käyttämällä. Kuviossa 5 on esitetty eräs esillä olevan keksinnön mukainen mittausjärjestely oven tai kalvon liikkeen mittamiseksi ns. Michelsonin interferometrillä. Kuviossa esitetyn mukaisesti järjestely käsittää itse oven lisäksi valonlähteenä toimivan laserin 10, optisen linssin 12 lasersäteen kohdistamiseksi, säteenjakajan 15 eli puoliläpäisevän peilin lasersäteen jakamiseksi ovelle ja referenssipeilille 16, referenssipeilin 16 ja kolmoisdetektorin 17 säteenjakajalta 15 tulevien lasersäteiden vastaanottamiseksi. Kuviossa esitetyn mukaisesti lasersäde on likimain fokuksessa sekä ovessa että referenssipeilissä. Referenssipeiliä 16 säädetään siten, että kolmen anturin d1, d2 ja d3 muodostamalle kolmoisdetektorille 17 syntyy  $\frac{3}{4}$  paperitasoa vastaan kohtisuorasta interferenssijuovasta. Kun  $x$  muuttuu oven liikkuessa, interferenssijuova liikkuu sivuttain detektorien yli, kuten kuvossa 6 on esitetty. Juova liikkuu yhden juovan välin, kun  $x$  muuttuu  $\lambda / 2$ :n verran. Juovan intensiteettijakauma on

$$I(z) = \frac{1}{2} A \left[ 1 + \cos \left( 2\pi \frac{z}{D} \right) \right]. \quad (38)$$

20

25

30

Jos interferenssijuova liikahtaa  $\varepsilon$ :n verran, saadaan antureiden  $d_1$ ,  $d_2$  ja  $d_3$  signaalit  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_3$  seuraavasti:

$$5 \quad I_1(\varepsilon) = \int_{\frac{2D}{4} + \varepsilon}^{\frac{D}{4} + \varepsilon} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(2\pi \frac{z}{D}\right) \right] dz = \frac{AD}{2 \cdot 4} + \frac{AD}{2 \cdot 2\pi} \left[ -\cos\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) + \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \right], \quad (39)$$

$$I_2(\varepsilon) = \int_{\frac{D}{4} + \varepsilon}^{\varepsilon} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(2\pi \frac{z}{D}\right) \right] dz = \frac{AD}{2 \cdot 4} + \frac{AD}{2 \cdot 2\pi} \left[ \cos\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) + \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \right] \quad \text{ja (40)}$$

$$10 \quad I_3(\varepsilon) = \int_{\varepsilon}^{\frac{D}{4} + \varepsilon} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(2\pi \frac{z}{D}\right) \right] dz = \frac{AD}{2 \cdot 4} + \frac{AD}{2 \cdot 2\pi} \left[ \cos\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) - \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \right]. \quad (41)$$

Tällöin

$$15 \quad \begin{cases} I_2(\varepsilon) - I_1(\varepsilon) = \frac{AD}{2\pi} \cos\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \\ I_2(\varepsilon) - I_3(\varepsilon) = \frac{AD}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \end{cases} \quad (42)$$

eli

$$20 \quad \frac{2\pi\varepsilon}{D} = \tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - I_3}{I_2 - I_1} \right\}. \quad (43)$$

Koska  $\varepsilon = \Delta z = 2D\Delta x/\lambda$ , niin

$$25 \quad \Delta x = \frac{\lambda}{4\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - I_3}{I_2 - I_1} \right\}. \quad (44)$$

Koska signaalit  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_3$  ovat  $90^\circ$ :n vaiheessa keskenään ja siten myös signaalit  $I_2 - I_1$  ja  $I_2 - I_3$  ovat  $90^\circ$ :n vaiheessa toistensa suhteen, niiden avulla voidaan selvitää kuviossa 7 esitetyjen tangenttifunktion epäjatkuvuuskohtien yli. Eli yhtälössä

$$\Delta x = \left( k + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - I_3}{I_2 - I_1} \right\}$$

saadaan mitatuksi kokonaisluvun  $k$  muutokset  $\pm 1$  tangentin epäjatkuvuuskohdissa  $\phi = (n + \frac{1}{2})\pi$ .

Pienin havaittava liike on

$$5 \quad \Delta x_{\min} = \frac{\sigma}{2(S/N)} = \frac{\lambda}{8(S/N)}, \quad (45)$$

jossa  $S = I_0/2$ .

10 Jos oven liike on pieni  $< \lambda/4$ , voidaan edellä kuvatun mittausjärjestelyn kolmoisdetektorin tilalla käyttää kaksoisdetektoria kuten optisessa viisarissa. Tällöin anturien yhteinen leveys on yhden juovan leveys ja

$$15 \quad \begin{cases} I_1 + I_2 = \frac{AD}{2} = \frac{I_0}{2} \\ I_1 - I_2 = \frac{AD}{\pi} \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right). \end{cases} \quad (46)$$

Koska  $\varepsilon = \Delta z = 2D\Delta x/\lambda$  on

$$20 \quad \Delta x = \frac{\lambda}{4\pi} \sin^{-1} \left\{ \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right\} \approx \frac{\lambda}{8} \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{\lambda}{4I_0} (I_1 - I_2), \quad (47)$$

jossa  $I_0$  on laserin valoteho. Tällöin valosignaalin amplitudi on

$$25 \quad A_t = I_1 - I_2 \approx 4 \frac{I_0 A_x}{\lambda}, \quad (48)$$

jossa  $A_x$  on oven liikkeen  $x$  amplitudi.

30 Interferometrisen kolmoisdetektorin käyttöön perustuvan mittausjärjestelyn perusideana siis on, että pitää saada aikaiseksi kolme signaalia, jotka ovat  $90^\circ$ :n vaiheerossa keskenään. Tällöin käytetään näitä kolmea signaalia saadaan poistetuksi valolähteen mahdollisesta välkkymisestä syntyvää virhetekijää, dc-komponentti. Näin ollen interferometrin mittaus voidaan toteuttaa myös siten että interferometri säädetään niin, että juovien väli on detektoreilla periaatteessa ääretön, jolloin mittausta ei

suoriteta juovien liikkeen perusteella. Tällöin lisäksi interferometri säädetään siten, että valonlähde järjestetään säteenjakajaan nähdyn 45 asteen kulmasta poikkeavaan kulmaan, jolloin sekä ovesta (tai kalvosta) että referenssipeilistä heijastuva valonsäde, jonka fokus on ovella (tai kalvolla) ja referenssipeilillä, ei palaan täsmälleen samaa reittiä takaisin vaan menevän valonsäteen ja palaavan valonsäteen välillä on pieni kulma. Tällöin kolmoisdetektori palaavien valonsäteiden mittaamiseksi voidaan toteuttaa siten, että kaksi detektoria, jotka muodostavat kaksoisdetektorin, järjestetään mittaamaan ovelta (tai kalvolta) palaavaa ja säteenjakajalta heijastuvaa valonsäettä sekä referenssipeililtä palaavaa ja säteenjakajan läpäisevää valonsädetä. Kolmas detektori järjestetään mittaamaan ovelta (tai kalvolta) palaavaa ja säteenjakajan läpäisevää valonsäettä sekä referenssipeililtä ja säteenjakajasta heijastuvaa valonsäettä (edullisesti kolmas detektori järjestetään valonlähteen läheisyyteen). Lisäksi kun referenssipeililtä palaavan valonsäteen kulkureitille järjestetään kaksi välinettä, kuten esimerkiksi kaksi lasilevyä, joista ainakin toisen asentoa voidaan säätää, voidaan mainittujen välineiden asentoa säätämällä aikaansaada  $90^\circ$ :n vaihe-ero kaksoisdetektorin muodostavien detektorien mittaussignaalien välille. Näin aikaan saadaan kolme signaalia  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_3$ , jotka ovat  $90^\circ$ :n vaihe-erossa keskenään.

Esillä olevan keksinnön mukaisen interferometrisen mittauksen etuja ovat mm: Yhtälön (44) mukaisesti vaste on erittäin lineaarinen jopa silloin kun oven tai kalvon liike on useita aallonpituuksia. Absoluuttinen tarkkuus on hyvä, koska interferenssesignaalin muoto on tarkasti  $1/2(1+\cos(2\pi z/D))$  -muotoinen. Lisäksi laser voidaan fokusoida oven mittauspisteesseen lähes pistemäisesti eikä diffraktio vaikuta tulokseen. Myöskään laserin intensiteetin  $I_0$  vaihtelu ei vaikuta mittaustuloksen arvoon, koska yhtälössä (44) interferenssijuovan maksimi-intensiteetin  $A$  arvo supistuu pois.

Kuten edellä on todettu, voidaan esillä olevan keksinnön mukaisessa mittausjärjestelyssä käyttää ensimmäisessä kammiossa tapahtuvien painevaihteluiden havaitsemiseen sekä sinänsä tunnettua kalvoa, joka voi olla jännitetty tai jänmittämätön, tai esillä olevan keksinnön erittäin edullisen suoritusmuodon mukaisesti esimerkiksi

piistä valmistettua ovea, jonka käyttö edelleen parantaa fotoakustisen detektorin mittaustarkkuutta ja -herkyyttä. Lisäksi alla esitetään menetelmä oven tai kalvon optimoimiseksi.

5 Kuviossa 8 ja 9 on esitetty kaaviomaisesti ja esimerkinomaisesti eräs edullinen esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa käytettävä paineanturi-na toimiva piistä valmistettu ovi. Paineanturi käsittää levymäisen, oven karmina toimivan reunaosan ja levymäisestä osasta uralla erotetun oven.  $L$  on oven leveys,  $h$  korkeus,  $d$  paksuus ja  $\Delta$  raon leveys.

10

Pienillä ikkunan läpi kammioon johdettavilla valolähteiden IR-tehoilla tasapainotilassa, kun  $W(t) = W_{av} + W_0 \cos(2\pi ft)$ , on

15

jossa  $a_x$  on osapaineessa  $p_x$  olevan kaasun absorptiokerroin,  $l$  kammion pituus,  $\alpha$  IR-säteen ja kammion keskiakselin välinen kulma ja  $W(t)$  nettovaloteho, joka menee kammioon. Eli  $W(t)$  on valon intensiteetti  $\times \pi R^2$ , jossa  $R$  on kammion säde.  $m_i$  on kaasukomponentin massa,  $c_v^i$  on vastaavan kaasun ominaislämpökapasiteetti,  $\rho_i$  on kaasun  $i$  tiheys ja  $V_0$  on pienemmän kammion tilavuus. Esimerkiksi

20

$$\sum_i c_v^i m_i = c_v^x m_x + c_v^N m_N = V_0 (c_v^x \rho_x + c_v^N \rho_N).$$

25

Yhtälössä (1) on oletettu, että  $\tau \ll f^{-1} \ll \tau_0$ , jossa  $\tau_0$  on aikavakio lämmönjohtumiselle ulos kammiosta ja  $\tau$  aikavakio absorptioenergian muuttumiselle lämmöksi. Edelleen

$$\Delta T = T(t) - T_0 = \int \left( \frac{dT}{dt} \right)_{T_0} dt = \frac{a_x p_x 2l(\cos \alpha)^{-1} W_0 \sin(2\pi ft)}{2\pi f V_0 \sum_i c_v^i \rho_i}. \quad (2)$$

Ideaalikaasun tilanyhtälöstä saadaan

30

$$\frac{dp}{p_0} + \frac{dV}{V_0} = \frac{dT}{T_0}. \quad (3)$$

Paineanturissa:

$$dV \approx \frac{1}{2} x A \\ Adp = kx = F, \quad (4)$$

5

jossa  $A$  on paineanturin pinta-ala,  $k$  on jousivakio ja  $x$  on liike. Yhtälöistä (3) ja (4) saadaan

$$x = \frac{\Delta T / T_0}{\frac{k}{Ap_0} + \frac{A}{2V_0}} \quad (\omega = 0). \quad (5)$$

10

Koska yhtälössä (2) esitetty  $\Delta T$  on moduloitu kulmataajuudella  $\omega$ , täytyy tarkastella oven (tai kalvon) liikeyhtälöä eli

$$m\ddot{x} - 2\beta m\dot{x} + \underbrace{m\omega_0^2 x}_{k} = F_0 e^{i\omega t}, \quad (6)$$

15

jossa  $F_0 e^{i\omega t}$  on pakkovoima,  $\beta$  vaimennusvakio,  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  resonanssikulmataajuus ja  $x$  liike joko oven päästä tai oven tai kalvon keskeltä. Yhtälön (6) ratkaisu

$$x = \frac{(F_0/m)e^{i\omega t}}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\omega\beta}, \quad (7)$$

20

josta saadaan amplitudi

$$\sqrt{x^* x} = A_x(\omega) = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}. \quad (8)$$

Yhtälöistä (3) ja (4) saadaan amplituodeille

25

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{1}{2} A_x(\omega) \frac{A}{V_0}$$

ja täten

$$A_x(\omega) = \frac{A \Delta p / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} = \frac{Ap_0 \left( \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{A_x(\omega)A}{2V_0} \right)}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}},$$

30

josta

$$A_x(\omega) = \frac{Ap_0 \frac{\Delta T}{T_0}}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2} + \frac{p_0 A^2}{2V_0}}. \quad (9)$$

5 Kuviossa 10a on kaaviomaisesti esitetty resonanssikulmataajuuden  $\omega_0$  vaikutus oven tai kalvon amplitudiin  $A_x(\omega)$ .

Jos  $\omega = 0$ , niin yhtälö (9) antaa yhtälön (5) eli  $A_x(0) = x$ , koska  $m\omega_0^2 = k$ .

10 Oven tai kalvon resonanssi on edullista mallintaa niin, ettei resonanssin tuomaa amplitudin kasvua  $\omega_0$ :n ympärillä huomioida (katso kuvio 10b). Siis jos  $\omega < \omega_0$ , on

$$A_x(\omega) \approx \frac{Ap_0 \Delta T/T_0}{m\omega_0^2 + \frac{p_0 A^2}{2V_0}} = \frac{p_0 \Delta T/T_0}{m\omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}} = \frac{p_0 \Delta T/T_0}{\rho d\omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}}, \quad (10)$$

15

ja jos  $\omega > \omega_0$ , on

$$A_x(\omega) \approx \frac{p_0 \Delta T/T_0}{\rho d\omega^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}}, \quad (11)$$

joissa  $\rho$  on oven tai kalvon tiheys ja  $d$  paksuus. Jos resonanssia ei hyödynnetä, ovea tai kalvoa kannattaa käyttää resonanssikulmataajuuden  $\omega_0$  alapuolella eli yhtälöä (10), josta nähdään, että amplitudin  $A_x(\omega)$  optimointi, eli maksimointi, tulee tehdä  $\omega_0$ :n  $d$ :n,  $V_0$ :n ja  $A$ :n avulla. Mitä pienempiä  $\omega_0$  ja  $A$  ovat, sitä suurempi  $A_x(\omega)$  on. Amplitudi saavuttaa maksimin, kun  $\rho d\omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}$  saavuttaa minimin. Näin tapahtuu,

kun

$$25 \quad \frac{\rho d\omega_0^2}{\rho d\omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}} = \frac{p_0 A}{\frac{p_0 A}{2V_0}} \quad (12)$$

ja

$$A_x^{opt}(\omega) \approx \frac{p_0 \Delta T/T_0}{2\rho d\omega_0^2} = \frac{p_0 \Delta T/T_0}{2 \frac{p_0 A}{2V_0}}. \quad (13)$$

Yhtälöiden (1) ja (2) avulla saadaan yhtälöstä (13)

$$A_x^{opt}(\omega) \approx \frac{p_0 \alpha_x p_x l (\cos \alpha)^{-1} W_0}{T_0 \omega V_0 \sum_i c_i \rho_i \rho d \omega_0^2}, \quad (14)$$

5 jossa  $\omega \leq \omega_0$ . Yhtälöstä nähdään, että vastetta voidaan kasvattaa parhaiten pienentämällä kulmataajuksia  $\omega$  ja  $\omega_0$ . Tyypillisillä kaupallisesti saatavilla mikrofoneilla resonanssitaajuus  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$  on tyypillisesti 10 – 20 kHz. Jos käytetään mikrofonia, jonka resonanssitaajuus  $f_0 = 20$  kHz, lähellä resonanssitaajuutta, saadaan  $A_x^{opt}(20 \text{ kHz})$ . Jos samanlaisesta kalvosta rakennetaan uusi mikrofoni, jonka resonanssitaajuus  $f_0 = 500$  Hz, niin

$$A_x^{opt}(500 \text{ Hz}) = \left( \frac{20 \text{ kHz}}{0,5 \text{ kHz}} \right)^3 A_x^{opt}(20 \text{ kHz}) = 40^3 A_x^{opt}(20 \text{ kHz}) = 64000 A_x^{opt}(20 \text{ kHz}), \quad (15)$$

15 jos mikrofonit on optimoitu yhtälön (12) mukaisesti. Jos edelleen käytettäisiin taa-  
juudelle 500 Hz optimoitua mikrofonia 50 Hz:n taajuudella, vaste kasvaisi edelleen kymmenkertaiseksi ja parannuskerroin olisi siis 640000. Resonanssitaajuutta voi-  
daan alla olevan yhtälön (16) perusteella pienentää ohentamalla ovea tai kalvoa.  
Tällöin saadaan lisää parannusta suhteessa  $d_1/d_2$  tilanteissa, joissa oven tai kalvon  
ohentaminen on teknisesti mahdollista.

20

Resonanssikulmataajuudet riippuvat oven tai kalvon dimensioista ja materiaalista.

Ovelle

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2E}{3\rho}} \frac{d}{L^2}, \quad A = Lh, \quad (16)$$

25 jossa  $E$  on materiaalin Youngin moduli,  $\rho$  tiheys,  $L$  oven leveys,  $h$  korkeus ja  $d$  pak-  
suus.

Ympyränmuotoiselle metallikalvolle, jossa ei ole jännitystä

$$30 \quad \varepsilon \omega_0 = \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \frac{4d}{r^2}, \quad (17)$$

jossa  $\sigma$  = Poissonin suhde ja  $r$  kalvon säde.

Jännitetylle ohuelle kalvolle (esimerkiksi Mylar)

5

$$_T\omega_0 = \frac{2.4\sqrt{T/\mu}}{r} = \frac{2.4}{r} \sqrt{\frac{F}{2\pi\rho d}}, \quad (18)$$

jossa  $T$  on kalvon jännitys ja  $\mu$  massa/yksikköala eli ts.  $\mu = m/a = \rho dA/A = \rho d$ .

10 Tarkkaan ottaen ohuellekin kalvolle (Mylar 2  $\mu\text{m}$ ) on

$$\omega_{rod}^2 = _E\omega_0^2 + _T\omega_0^2 \quad (19)$$

jossa kuitenkin  $_E\omega_0^2 \ll _T\omega_0^2$ .

15 Jos verrataan samasta materiaalista (piistä) valmistettua esillä olevan keksinnön erään edullisen suoritusesimerkin mukaista ovea, jonka korkeus on  $L/s$ , ympyränmuotoiseen kalvoon, jossa ei ole jännitystä, saadaan

20

$$\frac{A_{ovi}^{opt}}{A_{kalvo}^{opt}} \approx s\pi \left[ \frac{8}{s\pi(1-\sigma^2)} \right]^{1/3} \approx 20, \quad (20)$$

jos  $s = 10$  eli oven korkeus on kymmenesosa leveydestä  $L$ .

25

Verrattaessa esillä olevan keksinnön erään edullisen suoritusesimerkin mukaista ovea jännitetyyn Mylar-kalvoon, jota tyypillisesti käytetään tunnetun tekniikan mukaisissa mikrofoneissa, saadaan

$$\frac{A_{ovi}^{opt}}{A_{Mylar}^{opt}} \approx 43 \left( \frac{F}{N} \right)^{2/5}, \quad (21)$$

30

jossa  $F$  on kokonaisjännittävä voima Newtoneina ja  $s = 10$ . Suhde on tyypillisesti 10–20 riippuen siitä, kuinka pienellä voimalla  $F$  kalvo on saatu toimivaksi.

Esillä olevan keksinnön mukainen ovi on siis ratkaisu, joka antaa vähintään yhden kertaluvun paranemisen anturin vasteessa. Jos tämä parannus lisätään kulmataajuuuden antamaan parannukseen, voidaan matalaresonanssella ovella saada aikaan erittäin edullisesti muutaman miljoonan parannus anturin vasteeseen.

5

Esillä olevan keksinnön erään sovellutusmuodon mukaista ovi-anturia käyttäen on oven ja seinämän välinen rako saatava edullisesti mahdollisimman kapeaksi. Kamnio vuotaa raosta, mistä seuraa, että anturilla on alarajataajuus  $f_{cut}$ , jonka määräää oven raon pinta-ala  $a$  seuraavasti:

10

$$f_{cut} \propto v_0 \frac{a}{V_0}, \quad (22)$$

jossa  $v_0$  on äänennopeus kammiossa ja  $V \gg V_0$ .

15

Toisaalta on edullista, että kammioiden välillä on pieni reikä, joka tasaa hitaat painevaihletut kammioiden välillä, ja joka reikä voidaan siis toteuttaa edellä mainittuna rakona oven ja oven karmin välissä.

20

Verrattaessa optista viisaria ja interferometriä toisiinsa, voidaan todeta, että yhtälö (33) ei toteudu käytännössä, koska neliön muotoinen (suorakulmainen) ovi ei ole optimaalinen muoto optimoitaessa yhtälöä (10). Eli toisin sanoen esillä olevan keksinnön mukainen optinen viisari ja interferometri toimivat erittäin hyvin myös neliön muotoisella (suorakulmaisella) ovella, mutta jos herkkyyttä ja tarkkuutta halutaan edelleen parantaa, tulee oven muotoa muuttaa. Käytettäessä ovea, jonka korkeus on kymmenesosa leveydestä  $L$  (eli  $s = 10$ ), yhtälö (31) antaa kuviossa 11 esitetyn mukaisesti

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{3L\lambda}{16L/10(S/N)} \approx \frac{2\lambda}{S/N}, \quad (49)$$

joka on 16-kertainen vastaavaan interferometrin arvoon verrattuna (yht. (45)). Edelleen interferometri paranee optiseen viisariin verrattuna, jos  $s$  kasvaa eli ovi madaltuu, mikä toisaalta lisää myös oven liikkeen amplitudia  $A_x(\omega)$ .

5 Oven muotoa voidaan parantaa lisää esimerkiksi pienentämällä edelleen resonanssitaajuutta heikentämällä oven saranaa saranaan keskiosaa urittamalla, kuten kuviossa 12a on esitetty ja/tai lisäämällä oven pinta-alaa oven päässä, kuten kuviossa 12b on esitetty. Kuviossa 12b esitetty oven malli soveltuu erityisen hyvin interferometrin kertojaratkaisuun, joka on tarkemmin esitetty alla.

10 Koska käytettäessä interferometriä ovessa on lähes pistemäinen lasertäplä, voidaan interferometrissä soveltaa monikertaista heijastusta, eli kertoja, kuviossa 13 esitetyn mukaisesti. Laservalo menee päätypeiliin 21 heijastuen  $n$  -kertaa ovesta ja oven läheisyyteen järjestetystä kiinteästä tasopeilistä 20, joka on edullisesti järjestetty 15 samansuuntaiseksi ovipinnan kanssa. Laserin fokus on lähellä päätypeiliä, josta lasersäde tulee takaisin samaa reittiä heijastuen toiset  $n$  -kertaa ovesta. Jos ovi liikahdtaa matkan  $\Delta x$ , optinen matka muuttuu interferometrissä  $4n\Delta x$  verran ja vaste kasvaa  $2n$  -kertaiseksi, jos ei ole heijastustappioita.

20 Jos peilien ja oven heijastuskerroin on  $R$ , niin yhtälö (45) saa nyt uuden muodon:

$${}_R x_{\min} = \frac{\lambda}{2nR^{4n-2} 8(S/N)} = \frac{x_{\min}}{2nR^{4n-2}}. \quad (50)$$

25 Tällä menetelmällä saadaan noin 10-kertainen herkkyyden lisäys. Moninkertaista heijastusta voidaan soveltaa myösken esillä olevan keksinnön mukaisessa translatiomittauksen laserheijastuksessa, koska laser on fokusessa ovessa.

30 Verrattaessa esillä olevan keksinnön mukaista optista viisaria ja interferometriä toisiinsa, voidaan todeta, että molemmilla esillä olevan keksinnön mukaisilla mittauksjärjestelyillä saavutetaan olennainen parannus mittauksen tarkkuuteen ja herkkyy-

teen. Interferometrinen mittaus on vielä jonkin verran tarkempi kuin optinen viisari, mutta samalla mittausjärjestely on hivenen monimutkaisempi. Näin ollen tulee sovellus- ja tapauskohtaisesti harkita tarvittava herkkyys ja valita käytettävä mittausmenetelmä.

5

Kuten edellä todettiin, on tunnettujen fotodetektoreiden ongelmana niiden häiriintymisen ulkoisista äänistä. Esillä olevan keksinnön mukaisesti ulkoisten äänten vaikutusta voidaan vähentää sinänsä tunnetulla kaksoisdetektorilla, joka on esitetty kuviossa 1. Esillä olevan keksinnön mukaisesti varsinainen mittaussignaali- ja referenssignaali mitataan erikseen ja lasketaan niiden amplitudit, joiden erotus antaa tarkemman ja paremman suodatuksen ulkoisista häiriöitä. Erityisesti taajuusalueella, jossa ei ole kaasun aiheuttamaa signaalia, saadaan häiriöitä oleellisesti vähennettyä. Kuvatun kaltainen häiriöiden poistomenetelmä soveltuu myös muihin kuin edellä esitettyyn fotoakustiseen detektoriin. Näin ollen esillä olevan keksinnön mukaisella häiriöiden poistomenetelmällä voidaan parantaa myös esimerkiksi perinteisten mikrofonin käyttöön perustuvien fotoakustisten detektorien toimintaa.

20

Keksintöä ei ole pyritty mitenkään rajoittamaan vain edellisessä selityksessä esitettyyn suoritusmuotoon, vaan sitä voidaan vaihdella patenttivaatimusten esittämän keksinnöllisen ajatuksen puitteissa. Näin ollen esimerkiksi edellä esitetyissä esimerkeissä käytetyt kaksois- ja kolmoisdetektorit voidaan korvata CCD-rividetektorilla tai jollakin muulla useita detektoreita käsitteväällä monidetektorilla, koska esimerkeissä esitettyjen detektoreiden eli erillisten mittaussignaalien lukumäärä esittää ainoastaan vähintään tarvittavien mittaussignaalien määrää.

25

**Kirjallisuusviitteet:**

- [1] Nicolas Ledermann et. al., Integrated Ferroelectrics, Vol. 35, pp. 177-184 (2001)
- [2] M.H. de Paula et. al., J. Appl. Phys., Vol. 64, 3722-3724 (1988)
- 5 [3] M.H. de Paula et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol. 673, 3487-3491 (1992)

**Patenttivaatimukset:****1. Fotoakustinen detektori, joka käsittää ainakin**

- ensimmäisen kammion ( $V_0$ ), johon tutkittavaa kaasua voidaan johtaa,
- ikkunan moduloidun ja/tai pulssitetun infrapunasäteilyn ja/tai valon päästämiseksi ensimmäiseen kammioon ( $V_0$ ),
- toisen kammion (V), joka muodostaa mittauksen, jolla on tilavuus V, ja joka on yhteydessä ensimmäiseen kammioon ensimmäisen kammion seinämään järjestetyn aukon kautta,

- ainakin yhden anturin, joka on järjestetty ensimmäisen kammion seinämässä olevaan aukkoon ja järjestetty absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon ensimmäiseen kammioon aikaansaamien painevaihteluiden seurauksesta liikkuvaksi, ja
- välineet anturin liikkeen mittamiseksi, **tunnettua** siitä, että välineet anturin liikkeen mittamiseksi käsittevät ainakin yhden tai useamman valolähteen anturin tai sen osan valaisemiseksi ja yhden tai useamman monidetektori detektorin anturista heijastuneen valon vastaanottamiseksi ja anturin liikkeen mittamiseksi optisena kulma- ja/tai translaatiomittauksena.

- 2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettua** siitä, että valonlähde on laser tai hehkulanka.

- 3. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettua** siitä, että valolähteen lähetämän valonsäteen fokus on järjestetty likimain anturin pinnalle.

- 25 4. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettua** siitä, että valolähteen lähetämän valonsäteen fokus on järjestetty likimain kaksoisdetektorille.

- 5. Patenttivaatimuksen 1 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettua** siitä, että välineet anturin liikkeen mittamiseksi käsittevät ainakin valolähteenä toimivan laserin tai hehkulangan, ainakin yhden optisen linssin lasersäteen kohdistamiseksi, refe-

renssipeilin, säteenjakajan lasersäteen jakamiseksi anturille ja referenssipeilille ja detektorina toimivan kolmois- tai rividetektorin säteenjakajalta tulevien lasersäiden vastaanottamiseksi.

5 6. Patenttivaatimuksen 5 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että referenssipeili on järjestetty siten, että kolmois- tai rividetektorille syntyy  $\frac{3}{4}$  osaa interferenssijuovasta.

10 7. Patenttivaatimuksen 5 tai 6 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että välineet anturin liikkeen mittamiseksi käsitteväät lisäksi kiinteän tasopeilin ja kiinteen päätypeilin, jotka on järjestetty siten, että laservalo kulkee päätypeiliin ja takaisin heijastuen edestakaisin anturin ja tasopeilin välillä.

15 8. Patenttivaatimuksen 7 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että tasopeili ja/tai päätypeili on järjestetty siten, että säteenjakajalta anturin kautta päätypeilille kulkevaksi järjestetty lasersäde palaa samaa optista tietä takaisin päätypeililtä säteenjakajalle.

20 9. Jonkin edellä mainitun patenttivaatimuksen mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että se käsitteää lisäksi kolmannen kammion, joka on suljettu ja kooltaan identtinen ensimmäisen kammion kanssa, ja jossa on ensimmäisen kammion käsitämän aukon kanssa identtinen aukko, joka yhdistää kolmannen kammion toiseen kammioon, ja joka kolmannen kammion aukko on suljettu vastaavalla anturilla kuin ensimmäisen kammion aukko, ja jonka anturin liikettä mitataan vastaavalla tavalla kuin ensimmäisen kammion aukon sulkevan aukon liikettä, sekä välineet ensimmäisen kammion aukkoon järjestetystä anturista mitatun varsinaisen mittaussignaalin ja kolmannen kammion aukkoon järjestetystä anturista mitatun referenssisignaalin amplitudien laskemiseksi ja niiden erotuksen aikaansaamiseksi.

25

10. Mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittamiseksi, **tunnettu** siitä, että se käsittää ainakin valolähteenä toimivan laserin tai hehkulangan, ainakin yhden optisen linssin valonsäteen kohdistamiseksi, referenssipeilin, säteenjakajan valonsäteen jakamiseksi anturille ja referenssipeilille, 5 kiinteän tasopeilin ja kiinteän päätypeilin, jotka on järjestetty siten, että valonsäde kulkee päätypeiliin ja takaisin heijastuen edestakaisin anturin ja tasopeilin välillä, ja detektorina toimivan kolmois- tai rividetektorin säteenjakajalta tulevien valonsäiden vastaanottamiseksi.

10 11. Menetelmä fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittamiseksi, **tunnettu** siitä, että mittaus suoritetaan optisena mittauksena, jolloin anturia tai sen osaa valaistaan ja anturista heijastunutta valoa mitataan monidetektori detektorilla, ja - anturin liike mitataan kulmamittauksena kohdistamalla valonsäteen fokus likimain kaksoisdetektorille ja mittamalla heijastuneen valonsäteen siirtymää kaksoisdetek- 15 torilla tai rividetektorilla, tai - anturin liike mitataan translaatiomittauksena kohdistamalla valonsäteen fokus likimain anturin pinnalle ja kaksois- tai rividetektorille ja mittamalla heijastuneen valonsäteen siirtymää kaksois- tai rividetektorilla tai - anturin liike mitataan translaatiomittauksena käyttäen interferometria, ja mittaa- 20 malla anturista heijastuneen valonsäteen interferenssijuovan siirtymistä kolmois- tai rividetektorilla.

12. Menetelmä fotoakustisen detektorin optimoinnissa, **tunnettu** siitä, että paineenvaihteluiden seurauksena liikkuvaksi järjestetyn anturin amplitudin optimointi suoritetaan käytäällä optimointiyhtälöä:

25  $kun \omega < \omega_0$

$$A_x(\omega) = \frac{p_0 \Delta T / T_0}{\rho d \omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}},$$

30  $kun \omega > \omega_0$

$$A_x(\omega) = \frac{p_0 \Delta T / T_0}{\rho d \omega^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}},$$

13. Patenttivaatimuksen 12 mukainen menetelmä, **tunnettu** siitä, että amplitudin  $A_x(\omega)$  optimointi suoritetaan optimoimalla ainakin yhtä seuraavista muuttujista:  $\omega_0$ ,  $A$ ,  $d$  ja  $V_0$ .

## Tiivistelmä

Keksinnön kohtena on fotoakustinen detektori, joka käsitteää ainakin ensimmäisen kammion ( $V_0$ ), johon tutkittavaa kaasua voidaan johtaa, ikkunan moduloidun ja/tai pulssiteen infrapunasäteilyn ja/tai valon päästämiseksi ensimmäiseen kammioon ( $V_0$ ), toisen kammion ( $V$ ), joka muodostaa mittaustilan, jolla on tilavuus  $V$ , ja joka on yhteydessä ensimmäiseen kammioon ensimmäisen kammion seinämään järjestetyn aukon kautta, ainakin yhden anturin, joka on järjestetty ensimmäisen kammion seinämässä olevaan aukkoon ja järjestetty absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon ensimmäiseen kammioon aikaansaamien painevaihteluiden seurauksesta liikkuvaksi, ja välineet anturin liikkeen mittamiseksi. Välineet anturin liikkeen mittamiseksi käsitteivät ainakin yhden tai useamman valolähteen anturin tai sen osan valaisemiseksi ja yhden tai useamman monidetektori detektorin anturista heijastuneen valon vastaanottamiseksi ja anturin liikkeen mittamiseksi optisena kulma-ja/tai translaatiomittauksena. Lisäksi eksinnön kohtena on mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa, menetelmä fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittamiseksi ja menetelmä fotoakustisen detektorin optimoinnissa.

Fig. 1

L 4

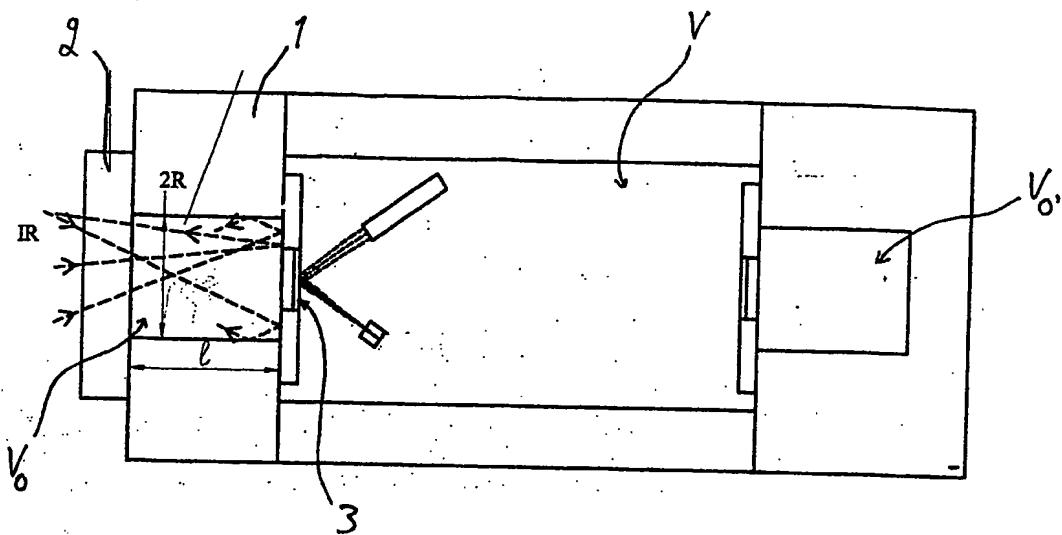


Fig. 1

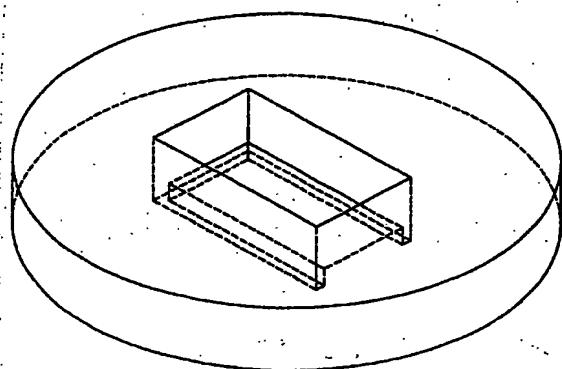


Fig. 8

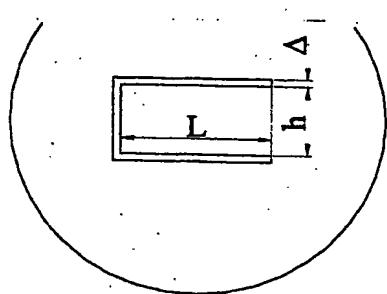


Fig. 9a

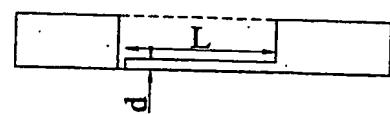


Fig. 9b

L 4

2

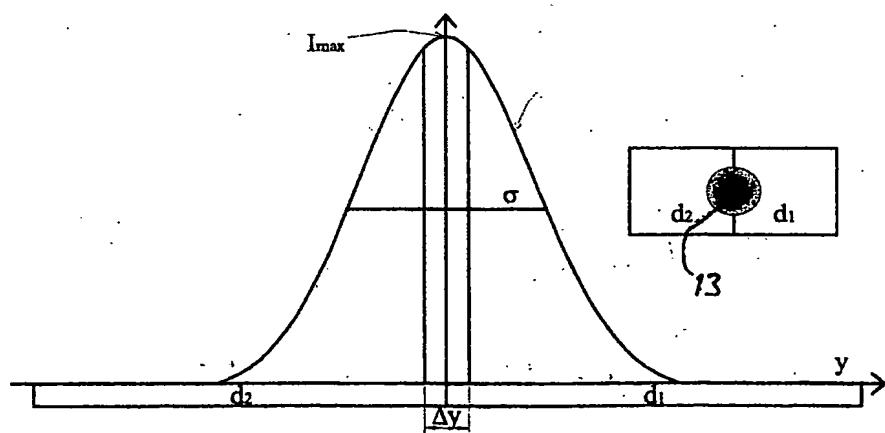
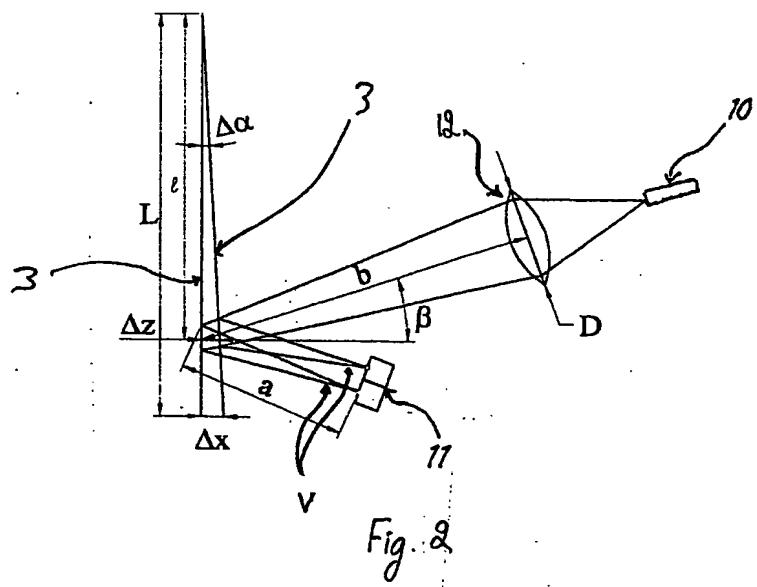


Fig. 3

4

3

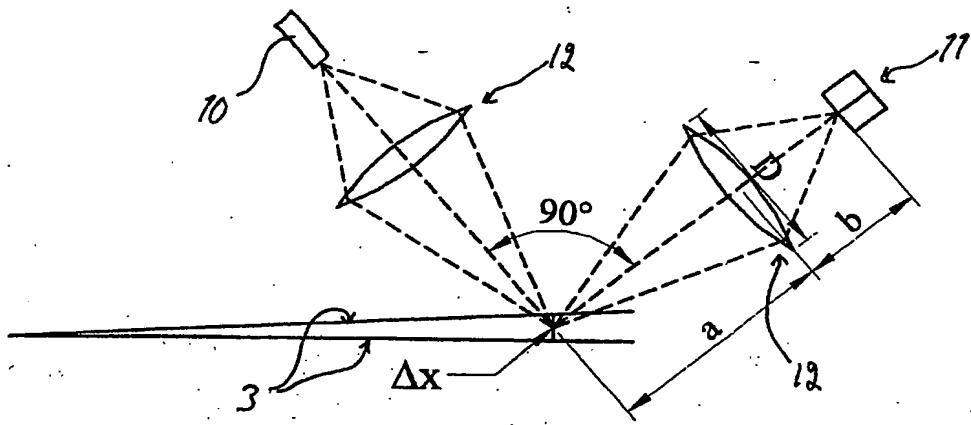


Fig. 4

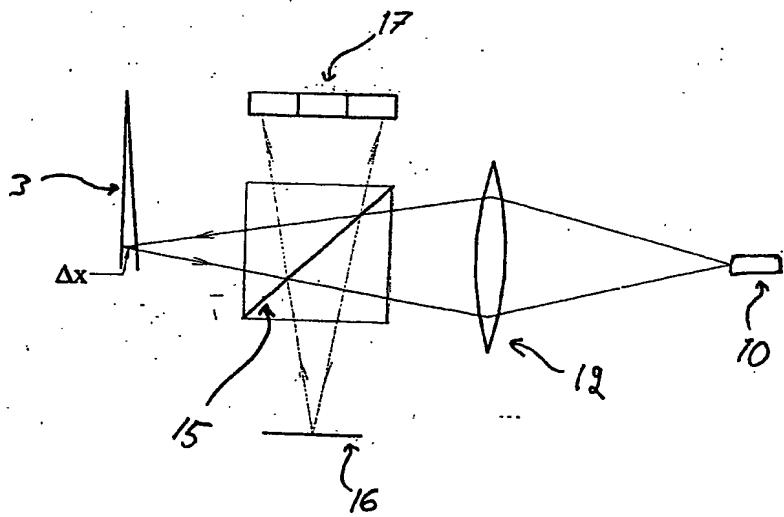


Fig. 5

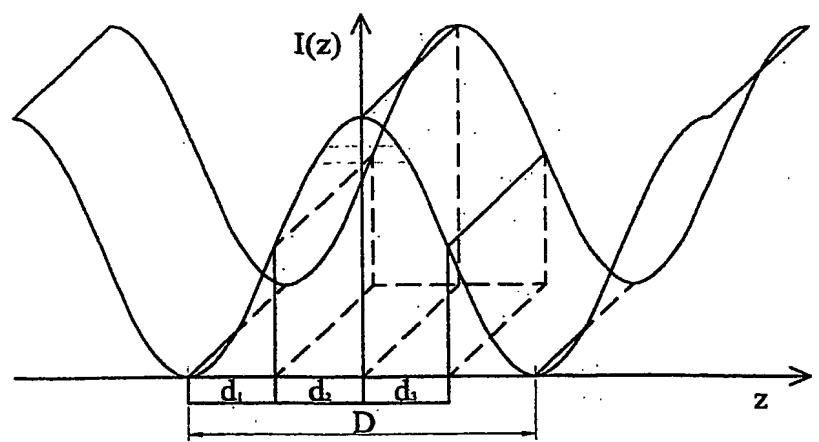


Fig. 6

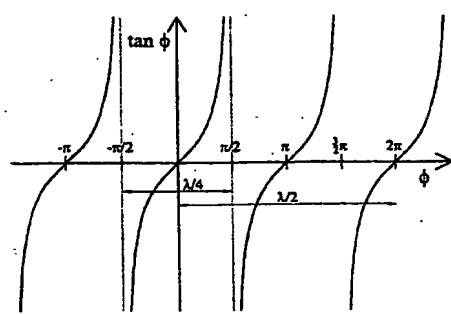


Fig. 7

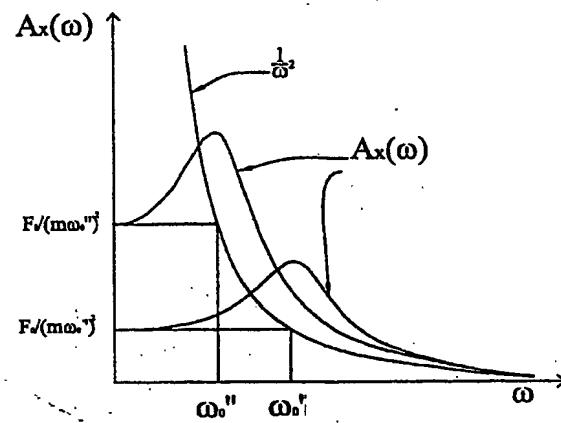


Fig. 10a

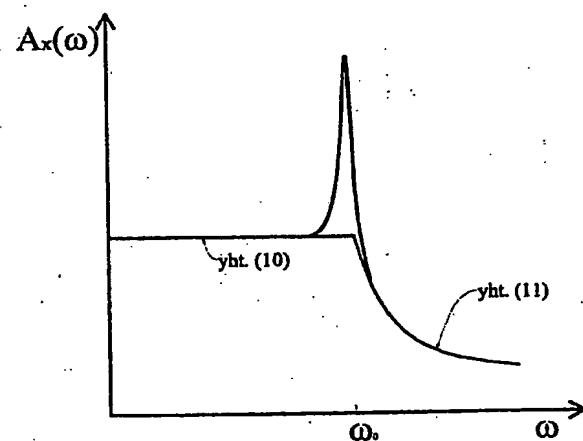


Fig. 10b

L 4

6

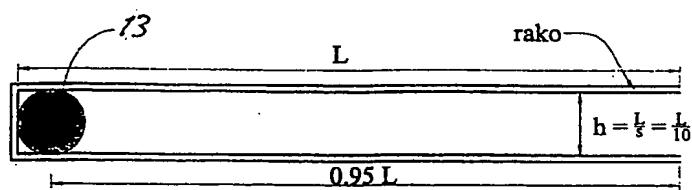


Fig. 11

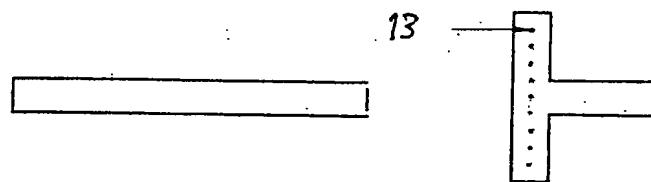


Fig. 12a

Fig. 12b

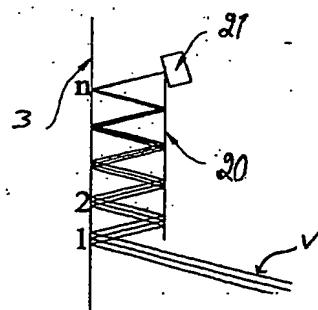


Fig. 13

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**